

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION  
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)(19) Organisation Mondiale de la Propriété  
Intellectuelle  
Bureau international(43) Date de la publication internationale  
13 mai 2004 (13.05.2004)

PCT

(10) Numéro de publication internationale  
WO 2004/040756 A2(51) Classification internationale des brevets<sup>7</sup> : H03H 2/00(21) Numéro de la demande internationale :  
PCT/FR2003/003180(22) Date de dépôt international :  
27 octobre 2003 (27.10.2003)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

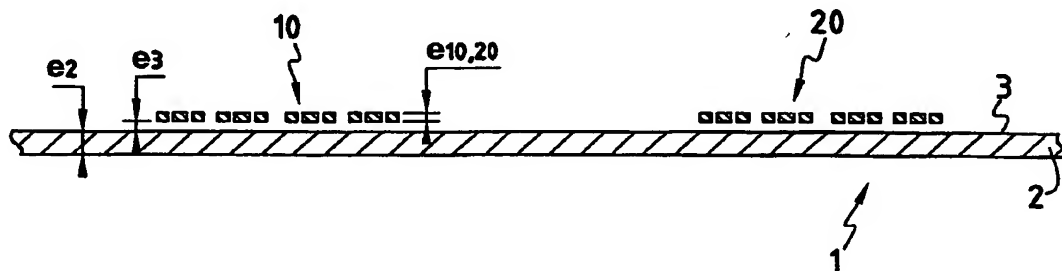
(30) Données relatives à la priorité :  
0213486 28 octobre 2002 (28.10.2002) FR(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : COM-  
MISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE [FR/FR]; 31  
Rue de la Fédération, F-75015 PARIS (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) :

BAILLEUL, Mathieu [FR/FR]; 19 Rue d'Alésia,  
F-75014 PARIS (FR). FERMON, Claude [FR/FR]; 6  
Allée Boileau, F-91400 ORSAY (FR).(74) Mandataires : THEVENET, Jean-Bruno etc.; CAB-  
INET BEAU DE LOMENIE, 158 Rue de l'Université,  
F-75340 PARIS Cedex 07 (FR).(81) États désignés (national) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ,  
BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ,  
DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH,  
GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC,  
LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW,  
MX, MZ, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC,  
SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,  
UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.(84) États désignés (régional) : brevet ARIPO (GH, GM, KE,  
LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), brevet  
eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), brevet

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: MAGNETOSTATIC WAVE DEVICE BASED ON THIN METAL FILMS, METHOD FOR MAKING SAME AND  
APPLICATION TO DEVICES FOR PROCESSING MICROWAVE SIGNALS(54) Titre : DISPOSITIF A ONDES MAGNETOSTATIQUES BASE SUR DES FILMS MINCES METALLIQUES, PROCEDE  
DE FABRICATION ET APPLICATION A DES DISPOSITIFS DE TRAITEMENT DE SIGNAUX HYPERFREQUENCES

(57) Abstract: The invention concerns an integrated magnetostatic wave device comprising a substrate (1), a conductive ferromagnetic thin film (2) arranged on the substrate (1), a first transducer antenna (10) for receiving microwave electric signals, arranged parallel to said ferromagnetic thin film (2) proximate thereto to generate in said material, through inductive coupling, magnetostatic waves or spin waves, and a second transducer antenna (20) for transmitting microwave electric signals, arranged parallel to said ferromagnetic thin film (2) proximate thereto to be inductively coupled and deliver microwave electric signals when a magnetostatic wave reaches the ferromagnetic thin film (2) said second antenna (10) being located on the same side of the ferromagnetic thin film (2) as the first antenna (10) substantially coplanar thereto.

(57) Abrégé : Le dispositif intégré à ondes magnétostatiques comprend un substrat (1), un film mince ferromagnétique (2) conducteur disposé sur le substrat (1), une première antenne transductrice (10) de réception de signaux électriques hyperfréquences, disposée parallèlement audit film mince ferromagnétique (2) à proximité de celui-ci pour créer dans ce matériau, par couplage inductif, des ondes magnétostatiques ou des ondes de spin, et une deuxième antenne transductrice (20) d'émission de signaux électriques hyperfréquences, disposée parallèlement audit film mince ferromagnétique (2) à proximité de celui-ci pour être couplée inductivement et délivrer des signaux électriques hyperfréquences lors de l'arrivée d'une onde magnétostatique dans le film mince ferromagnétique (2), ladite deuxième antenne (20) étant située du même côté du film mince ferromagnétique (2) que la première antenne (10) de façon essentiellement coplanaire à cette dernière.



européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), brevet OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

*En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.*

**Publiée :**

- *sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport*

Dispositif à ondes magnétostatiques basé sur des films minces métalliques, procédé de fabrication et application à des dispositifs de traitement de signaux hyperfréquences

5

La présente invention concerne les dispositifs à ondes magnétostatiques, leur procédé de fabrication et leurs applications à des dispositifs de traitement de signaux hyperfréquences.

On connaît déjà divers dispositifs à ondes magnétostatiques utilisant des couches épaisses d'un matériau isolant ferrimagnétique à très faibles pertes tel que le monocristal de grenat d'yttrium et de fer  $Y_3Fe_5O_{12}$  (en abrégé, YIG) qui est lui-même formé par épitaxie en phase liquide sur un substrat non magnétique tel qu'un grenat de gadolinium et de gallium  $Gd_3Ga_5O_{12}$  (en abrégé, GGG).

De tels dispositifs connus à ondes magnétostatiques sont décrits par exemple dans le document de Waguïh S. Ishak intitulé "Magnetostatic Wave Technology: A Review", Proceedings of the IEEE, Vol. 76, No. 2, Février 1988.

Ces dispositifs à YIG ne sont pas facilement intégrables à un substrat semiconducteur et leur réalisation matérielle est très délicate et coûteuse. Ils sont à couche épaisse, de l'ordre de 5  $\mu m$ . Le matériau étant à faible relaxation, les composants hyperfréquences qu'ils permettent de réaliser ont une atténuation relativement faible, environ 20 db. En outre, la commutation est limitée autour de la milliseconde en raison de leur taille.

On connaît encore divers dispositifs à ondes magnétostatiques utilisant des ferrites, comme cela est indiqué par exemple dans l'article de Martha Pardavi-Morvath, intitulé "Microwave application of soft ferrites", paru dans le Journal of Magnetism and Magnetic Materials 215-216 (2000), pages 171-183.

Toutefois, les dispositifs de ce type ne se prêtent pas non plus à une intégration aisée, présentent des couches de matériau ferrimagnétique épaisses, de l'ordre du millimètre.

On connaît encore par le brevet US 4 853 660 des dispositifs hyperfréquences intégrables comportant un film de matériau ferromagnétique métallique disposé sur un substrat diélectrique.

Toutefois, selon ce document, il est prévu un seul élément d'entrée-sortie constitué par ruban amagnétique couplé à un ruban ferromagnétique. L'atténuation d'ondes hyperfréquences se propageant le long de ce ruban est considérablement augmentée lorsque la matériau ferromagnétique

5 satisfait la condition de résonance ferromagnétique (ici une résonance uniforme). Toutefois, l'existence d'un seul élément d'entrée-sortie limite fortement les applications d'un tel dispositif.

La présente invention vise à remédier aux inconvénients des dispositifs précités et à permettre de réaliser des dispositifs à ondes

10 magnétostatiques facilement intégrables sur des substrats semi-conducteurs selon les processus de fabrication de la microélectronique et permettant de travailler à des fréquences de travail plus élevées que les dispositifs à YIG.

L'invention vise encore à permettre la fabrication de différents types

15 de dispositifs fonctionnels hyperfréquences ayant des performances satisfaisantes, tout en présentant un encombrement et un coût réduits.

Ces buts sont atteints conformément à l'invention grâce à un dispositif intégré à ondes magnétostatiques, caractérisé en ce qu'il comprend un substrat, un film mince ferromagnétique conducteur,

20 d'épaisseur (e) comprise entre environ 250 et 450 nanomètres, et de préférence de l'ordre de 300 nanomètres, ce film mince étant disposé sur ledit substrat, une première antenne transductrice de réception de signaux électriques hyperfréquences, disposée parallèlement audit film mince ferromagnétique à proximité de celui-ci pour créer dans ce matériau, par

25 couplage inductif, des ondes magnétostatiques ou des ondes de spin, et une deuxième antenne transductrice d'émission de signaux électriques hyperfréquences, disposée parallèlement audit film mince ferromagnétique à proximité de celui-ci pour être couplée inductivement et délivrer des signaux électriques hyperfréquences lors de l'arrivée d'une onde

30 magnétostatique dans le film mince ferromagnétique, ladite deuxième antenne étant située du même côté du film mince ferromagnétique que la première antenne de façon essentiellement coplanaire à cette dernière.

Le film mince ferromagnétique est de préférence en un alliage magnétique dont l'aimantation à saturation est supérieure ou égale à 0,6T.

35 Le film mince ferromagnétique est avantageusement en un alliage magnétique très doux tel que  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ .

Le film mince ferromagnétique présente une largeur (L) de l'ordre de quelques dizaines de micromètres.

La distance ( $e_3$ ) entre d'une part les première et deuxième  
5 antennes transductrices et d'autre part le film mince ferromagnétique est de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de nanomètres.

La distance d'écartement (D) entre les première et deuxième antennes transductrices est comprise entre environ 30 et 100 micromètres et de préférence voisine de 40 micromètres.

10 Les première et deuxième antennes transductrices peuvent comprendre une âme centrale et deux conducteurs latéraux de masse parallèles à l'âme centrale et situés sans contact de part et d'autre de celle-ci.

L'âme centrale présente une largeur de l'ordre de quelques  
15 micromètres.

Chacune des première et deuxième antennes transductrices s'étend sur toute la largeur (L) du film mince ferromagnétique et occupe dans le sens longitudinal de ce film un espace dont la largeur est inférieure à ladite distance d'écartement (D) et peut être compris entre environ 10 et  
20 60 micromètres.

Selon un mode de réalisation particulier, l'une au moins des première et deuxième antennes transductrices présente une forme de serpent avec une succession de branches s'étendant dans le sens de la largeur (L) du film mince ferromagnétique.

25 La fréquence des ondes hyperfréquences peut être comprise entre environ 1 GHz et 100 GHz.

Le dispositif selon l'invention réalisé de façon intégrée peut comprendre un substrat semiconducteur.

Selon un mode de réalisation particulier qui permet la mesure des  
30 pertes et d'en déduire la relaxation magnétique, le dispositif comprend une troisième antenne transductrice disposée parallèlement audit film mince ferromagnétique à proximité de celui-ci pour être couplée inductivement et délivrer des signaux électriques hyperfréquences lors de l'arrivée d'une onde magnétostatique dans le film mince ferromagnétique,  
35 ladite troisième antenne étant située du même côté du film mince

ferromagnétique que les première et deuxième antennes en étant interposée entre celles-ci de façon coplanaire.

Le dispositif selon l'invention peut être appliqué à un atténuateur ou un commutateur commandable par un courant et dans ce cas comprend  
5 en outre des premiers moyens d'application d'un champ magnétique ( $H_A$ ) transversal dans le sens de la largeur (L) du film mince ferromagnétique, des seconds moyens d'application d'un champ magnétique ( $H_B$ ) longitudinal dans le sens de la longueur du film mince ferromagnétique et des moyens de commande d'au moins l'un des premiers et deuxièmes  
10 moyens d'application d'un champ magnétique pour modifier sélectivement les caractéristiques du champ magnétique résultant ( $H_R$ ) agissant sur le film mince ferromagnétique.

Le dispositif selon l'invention peut encore être appliqué à un isolateur ou un circulateur (auquel cas au moins une troisième antenne  
15 transductrice est ajoutée). Le dispositif comprend alors des moyens pour orienter un champ magnétique appliqué au film mince ferromagnétique de telle manière qu'il y ait non réciprocity des première et deuxième antennes transductrices, un signal d'ondes magnétostatiques n'étant transmis de façon significative que de la première antenne vers la seconde antenne.  
20 Cette non-réciprocity peut être en particulier obtenue lorsque le champ est appliqué dans le plan du film, perpendiculairement à la direction de propagation des ondes (configuration dite des ondes magnétostatiques de surface).

Le dispositif selon l'invention peut également comprendre un film  
25 mince ferromagnétique conducteur en un matériau présentant par anisotropie cubique plusieurs états stables et un tel dispositif peut être appliqué à un commutateur commandable par un courant, des moyens étant prévus pour appliquer des impulsions de champ magnétique afin de faire basculer le film mince d'un état stable à l'autre.

30 Ainsi la présente invention permet de réaliser des composants hyperfréquences pour télécommunications, qui sont à la fois intégrables, à hautes performances et de faible coût.

L'invention permet ainsi de réaliser par exemple des commutateurs intégrables aux performances en commutation améliorées, avec une  
35 atténuation de l'ordre de 40 à 50 dB lorsque l'interrupteur est ouvert et un temps de basculement de l'ordre de la nanoseconde. De tels

commutateurs peuvent aussi être utilisés en tant qu'atténuateurs compte tenu de l'étendue de la plage d'atténuation.

Dans cette application, l'invention exploite le caractère de non réciprocité de la propagation de certaines ondes magnétostatiques. Pour  
5 une certaine orientation du champ magnétique appliqué au film ferromagnétique, le signal se transmet de la première antenne vers la deuxième antenne, mais se trouve affaibli d'un facteur pouvant atteindre 20 dB dans le sens inverse de la deuxième antenne vers la première antenne. Ceci permet de réaliser des isolateurs et des circulateurs de coût  
10 bien inférieur aux dispositifs du même type réalisés en technologie YIG.

Au contraire des dispositifs utilisant des isolants tels que le YIG, les dispositifs selon l'invention, par le caractère métallique du film ferromagnétique, peuvent être conçus de manière à bénéficier de l'effet de peau de ce film et peuvent en tirer profit grâce à la mise en œuvre d'au  
15 moins deux antennes. Au-delà de la profondeur de peau, l'épaisseur du matériau se comporte comme un miroir qui canalise les ondes en surface. Lorsqu'elles parcourent le film ferromagnétique de la deuxième antenne vers la première antenne, les ondes sont de même canalisées sur la surface opposée aux antennes et ne se mélangent aucunement aux ondes  
20 circulant sur la surface en regard des antennes.

La nature métallique du matériau ferromagnétique se traduit par une très forte atténuation, principalement due aux électrons. Ceci est un désavantage lorsque les distances de propagation sont élevées, mais n'en n'est plus un si elles sont très courtes. Les faibles dimensions du dispositif  
25 sont ainsi particulièrement adaptées aux fortes déperditions d'énergie du matériau.

Des dispositifs à ondes magnétostatiques selon l'invention, qui peuvent être placés dans des régimes de fort couplage et de forte non-réciprocité, sont ainsi aptes à une fabrication sous la forme de dispositifs  
30 totalement intégrés d'une centaine de micromètres de côté avec des pertes d'insertion de quelques décibels et une sélectivité d'au moins une vingtaine de décibels.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description suivante de modes particuliers de réalisation, donnés à titre  
35 d'exemples, en référence aux dessins annexés, sur lesquels :

- la Figure 1 est une vue schématique de dessus montrant un exemple de réalisation d'un dispositif à ondes magnétostatiques selon l'invention avec un film ferromagnétique conducteur et deux antennes transductrices coplanaires,

5       - la Figure 2 est une vue en coupe selon la ligne II-II de la Figure 1,

- la Figure 3 est une vue de dessus d'un exemple d'antenne utilisable dans le cadre du dispositif selon l'invention,

- la Figure 4 est une vue schématique de dessus d'un exemple de dispositif à ondes magnétostatiques à trois antennes permettant  
10       notamment d'évaluer des pertes et de caractériser la relaxation des ondes,

- la Figure 5 est une vue schématique d'un exemple d'application du dispositif selon l'invention à un atténuateur commandable par un courant,

- la Figure 6 est une vue schématique de dessus d'un exemple d'application du dispositif selon l'invention à un circulateur à champ  
15       magnétique radial et dans le plan du circulateur,

- les Figures 7A à 7J illustrent différentes étapes d'un exemple de procédé de fabrication d'échantillons intégrés de motifs magnétiques et d'antennes pouvant constituer des éléments des dispositifs selon l'invention,

20       - la Figure 8 est un ensemble de courbes donnant la dispersion d'un matériau magnétique pour plusieurs modes de propagation, et

- la Figure 9 est un ensemble de courbes donnant la transmission des ondes magnétostatiques en fonction de la distance entre antennes.

Selon une caractéristique essentielle de la présente invention, il est  
25       mis en œuvre un film mince 2 de matériau ferromagnétique conducteur (Figures 1 et 2).

On peut avantageusement utiliser un film de permalloy  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  qui est un alliage magnétique très doux ayant une aimantation à saturation de l'ordre de 1 T. Toutefois, en fonction des applications, d'autres matériaux  
30       ferromagnétiques métalliques pourraient être utilisés, tels que par exemple du fer épitaxial qui présente des pertes un peu moins importantes.

Plus généralement, l'invention est applicable à tous les matériaux ferromagnétiques conducteurs ; toutefois en pratique, son fonctionnement  
35       n'est satisfaisant que lorsque le matériau ferromagnétique utilisé possède une aimantation à saturation supérieure ou égale à 0,6 T. Il est



avantageux d'utiliser les matériaux dont l'aimantation à saturation est la plus élevée possible. Des tests de fonctionnement ont notamment été réalisés avec du fer pur à 2,2 T et du cobalt pur à 1,7 T. Les alliages de ces métaux sont bien adaptés à l'invention.

5 Dans le cas de matériaux métalliques, l'amortissement s'avère toujours plus élevé que dans le YIG, ce qui est généralement attribué au caractère itinérant des électrons.

Ainsi, dans un échantillon métallique, les champs électromagnétiques haute fréquence sont écrantés par les électrons de  
10 conduction sur une distance égale à la profondeur de peau. Le mode de résonance correspondant a un caractère évanescent dans la direction normale à la couche et il est décrit par un vecteur d'onde  $k_{\text{FOUC}}$  ayant une composante imaginaire non nulle. Les courants de Foucault peuvent également contribuer à l'amortissement d'une onde se propageant le long  
15 de la surface de l'échantillon, l'influence de ces courants de Foucault étant particulièrement grande si l'épaisseur du film, la longueur d'onde de l'onde magnétostatique et la profondeur de peau sont du même ordre de grandeur.

On notera également qu'à une échelle plus microscopique, le  
20 caractère itinérant des électrons se traduit par des processus de diffusion électron-magnons par les ondes de spin qui n'existent pas dans les isolants et augmentent la relaxation.

L'utilisation du permalloy comme film mince ferromagnétique présente des avantages intéressants. Ce matériau est en effet un alliage  
25 de nickel et de fer qui présentent des magnétostrictions non nulles et opposées. Pour un mélange contenant environ 20% de fer, les contributions magnétostrictives des deux éléments se compensent. Il est produit en outre un phénomène similaire pour l'anisotropie magnétocristalline. Ces propriétés présentent un avantage pratique important  
30 sauf précautions particulières, les matériaux fabriqués sont en effets polycristallins ne présentant ni anisotropie, ni magnétostriction (matériau dit "doux"), de sorte que le permalloy a des propriétés presque idéales même sous forme polycristalline.

Des films minces de permalloy peuvent être obtenus par des  
35 techniques de dépôt par pulvérisation et présentent des propriétés très voisines de celles du permalloy massif.

Un film mince 2 peut être déposé sur un substrat (Figure 2) pouvant être par exemple en verre ou en silicium. Il se prête tout à fait à des dépôts sur des substrats semiconducteurs utilisés dans le cadre des techniques de la microélectronique.

5 Comme on peut le voir sur les Figures 1 et 2, un dispositif selon l'invention comprend deux antennes transductrices coplanaires 10, 20 situées à proximité du film mince ferromagnétique 2 parallèlement à celui-ci de manière à être couplées inductivement à ce dernier.

10 Chaque antenne 10, 20 est située à une faible distance  $e_3$  de la même face du film ferromagnétique 2.

Chaque antenne 10, 20 est disposée transversalement par rapport au film ferromagnétique 2 et s'étend sur toute la largeur de ce dernier. Elle présente ainsi une longueur au moins égale à la largeur L du film 2. La deuxième antenne 20 d'émission délivre des signaux électriques  
15 hyperfréquences lors de l'arrivée d'une onde magnétostatique dans le film 2.

Les ondes hyperfréquences appliquées à l'antenne 10 et émises par l'antenne 20 peuvent se situer dans un domaine de fréquences comprises entre 1 GHz et 20 GHz et être par exemple de l'ordre de 8 GHz mais  
20 peuvent aussi être comprises dans un domaine de fréquences plus élevées comprises entre 20 GHz et 100 GHz.

Les antennes 10, 20 représentées sur les Figures 1 et 2, ainsi que sur l'exemple particulier de la Figure 3, sont du type guide d'onde coplanaire à plan de masse interrompu.

25 Si l'on considère le cas de la Figure 3 qui représente une antenne avec une seule branche transversale, on voit que sa réalisation coplanaire facilite la réalisation puisqu'elle n'implique pas d'étapes de lithographie supplémentaires comme ce serait le cas avec des antennes comportant un conducteur de masse situé dans un plan différent de celui de l'âme  
30 centrale.

L'antenne 10 représentée sur la Figure 3 présente une configuration symétrique du guide d'onde coplanaire avec un plan de masse 32, 33 situé de part et d'autre du conducteur central 32, mais une telle configuration n'est pas obligatoire. Par ailleurs, les dimensions des conducteurs du plan  
35 de masse 32, 33 ont été limitées pour éviter que les ondes de spin ne se propagent sous un vaste plan métallique. Une extrémité de l'antenne est

munie d'un court-circuit 34 tandis que l'âme centrale 31 et les conducteurs latéraux du plan de masse 32, 33 sont prolongés à l'autre extrémité par des pistes plus larges 35a, 36a, 37a de liaison à des plots de connexion 35, 36, 37.

5 La largeur  $L$  du film mince ferromagnétique peut être comprise entre quelques dizaines et quelques centaines de micromètres. La largeur  $L$  peut ainsi être typiquement égale à 100  $\mu\text{m}$ .

La distance  $e_3$  de couplage entre d'une part les antennes transductrices 10, 20 et d'autre part le film mince 2 peut être de l'ordre de  
10 quelques dizaines de nanomètres à quelques centaines de nanomètres et par exemple typiquement de 100 nanomètres.

L'épaisseur  $e_{10, 20}$  des éléments composant les antennes 10, 20 peut être par exemple de l'ordre de 500 nanomètres.

L'âme centrale 31 des antennes 10, 20 peut comprendre une  
15 largeur  $d_{10}$  de l'ordre de quelques micromètres, par exemple 3,5 ou 4  $\mu\text{m}$ .

La largeur des conducteurs latéraux de masse 32, 33 n'est pas critique. A titre d'exemple, la distance  $d_{11}$  entre les faces internes des conducteurs de masse 32, 33 peut être de l'ordre de 8,5  $\mu\text{m}$  tandis que la distance  $d_{12}$  entre les faces externes des conducteurs de masse 32, 30  
20 peut être de l'ordre de 12,5  $\mu\text{m}$ .

Chaque antenne 10, 20 peut s'étendre sur une longueur  $L_{10}$  légèrement supérieure à la largeur  $L$  du film 2.

La distance d'écartement  $D$  (Figure 1) entre les antennes 10 et 20 est comprise entre 30 et 100 micromètres et peut de préférence être  
25 voisine de 40  $\mu\text{m}$ .

Chaque antenne 10, 20 occupe dans le sens longitudinal du film un espace dont la largeur est inférieure à la distance d'écartement  $D$  et qui est compris de préférence entre 10 et 60 micromètres.

Comme on l'a représenté sur les Figures 1 et 2, chaque antenne 10,  
30 20 peut présenter une forme plus complexe que celle de la Figure 3 et peut ainsi présenter une forme de serpent avec une succession de branches parallèles 51, 52, 53, 54 s'étendant dans le sens de la largeur  $L$  du film 2 et réunies par de courtes portions de liaison 55, 56, 57 alternativement de part et d'autre du film 2. Ceci permet d'accroître la  
35 longueur totale de chaque antenne et par son caractère périodique, d'accroître sa sélectivité en limitant le nombre des vecteurs d'onde sur

lesquels est répartie l'énergie injectée, de sorte que l'efficacité de la transduction peut être améliorée.

Dans l'exemple des Figures 1 et 2, l'écartement D entre les antennes 10, 20 peut être par exemple de l'ordre de 75  $\mu\text{m}$  et la largeur  
5 D<sub>10</sub>, D<sub>20</sub> de chaque antenne 10, 20 en forme de serpent dans le sens longitudinal du film 2 peut être par exemple de l'ordre de 50  $\mu\text{m}$ .

Le repliement des antennes 10, 20 en plusieurs branches d'un serpent a pour effet de réduire la bande passante autour de la résonance.

10 Dans le type d'antenne des Figures 1 à 3, la largeur des deux conducteurs de masse 32, 33 est considérablement réduite, et les masses des deux antennes qui se trouvent disjointes ne sont connectées à la masse générale du circuit qu'en des points électriquement très éloignés, pour mieux contrôler la dispersion des ondes de spin.

15 On donnera ci-dessous quelques indications concernant la conception d'un dispositif à ondes magnétostatiques à deux antennes coplanaires 10, 20 telles que celles des Figures 1 et 2.

La variable initiale est la fréquence de travail des ondes hyperfréquences. La première étape de conception réside dans la  
20 détermination du pas des antennes (nécessairement accordées sur la même fréquence, mais pouvant être réalisées à l'aide de technologies différentes). Entre un brin "aller" transversal à l'axe du film, et le brin "retour", il existe selon l'axe du film une distance p qui constitue le pas de l'antenne. Ce pas p doit être égal à  $2\pi$  divisé par le module du vecteur  
25 d'onde Q qui représente l'amplitude des oscillations que l'on souhaite créer dans le matériau magnétique. Préalablement à la conception proprement dite, une mesure est effectuée des variations de la fréquence de résonance  $f_0$  en fonction de l'amplitude Q du vecteur d'onde et du mode d'onde, la valeur H du champ magnétique de polarisation étant un  
30 paramètre. Pour chaque valeur du champ magnétique, il existe plusieurs courbes correspondant chacune à un mode d'onde. A partir de la fréquence, on choisit donc un module Q de vecteur d'onde permettant une propagation des ondes magnétostatiques dans le film que l'on juge acceptable. Le pas de l'antenne en découle alors par la relation ci-dessus.

35 En pratique, on peut préférer une autre courbe équivalente, représentant les variations de la fréquence de résonance  $f_0$  en fonction de

la valeur  $H$  du champ magnétique de polarisation, l'amplitude  $Q$  du vecteur d'onde étant un paramètre. On obtient ainsi plusieurs courbes correspondant à plusieurs modes d'ondes. A partir de la fréquence, on choisit un mode d'onde permettant de fonctionner avec le pas d'antenne et le champ magnétique que l'on juge acceptable.

La deuxième étape de la conception consiste à déterminer la distance  $D$  entre les deux antennes. Lorsque cette distance  $D$  croît, l'amplitude de l'onde transmise décroît exponentiellement (amplitude de la forme  $A_0 e^{-D}$ ). D'autre part, l'amplitude de l'onde parasite transmise directement d'antenne à antenne par l'onde est de la forme  $A_0 D^{-n}$ , cette amplitude étant diminuée significativement (par exemple divisée par un facteur de l'ordre de 1,5 à 5 ou 10) si l'on interpose entre les deux antennes une électrode de masse, reliée à la masse électrique en un point éloigné du point où sont raccordées les masses des deux antennes. On choisit donc dans cette seconde étape quel est le niveau de transmission parasite par l'air que l'on tolère (ce qui revient à déterminer un seuil de bruit acceptable). En s'autorisant ce niveau de transmission parasite, on trace sur la Figure 9 une horizontale qui coupe en un point de fonctionnement une courbe  $A$  dont l'abscisse donne la distance. Pour cette distance, on peut trouver la valeur de la transmission des ondes dans le film, et si elle est trop faible, améliorer le blindage entre les deux antennes avant de réitérer cette seconde étape. On peut également revenir à la première étape en modifiant dans le sens approprié une des grandeurs d'entrée.

Sur la Figure 9, trois courbes  $A$ ,  $B$ ,  $C$  représentent la transmission des ondes en fonction de la distance  $D$  entre les antennes 10, 20.

La courbe  $A$  représente la transmission dans le film ferromagnétique 2.

La courbe  $B$  représente la transmission dans l'air, sans qu'aucune électrode de masse soit interposée entre les antennes 10, 20.

La courbe  $C$  représente la transmission dans l'air, lorsqu'une électrode de masse additionnelle est interposée entre les antennes 10, 20.

La propagation des ondes magnétostatiques dans le film métallique magnétique mince 2 dépend de l'épaisseur de ce film. Les propriétés du dispositif selon l'invention dépendent du changement de comportement de ce film au voisinage des fréquences de résonance magnétique. Au

maximum de la résonance, le comportement magnétique du film est comparable au comportement d'un "circuit bouchon résonant" en radiofréquences.

Une troisième étape de conception consiste à régler la longueur  
5 totale des antennes de telle manière que celles-ci aient, en résonance, une impédance d'entrée proche de l'impédance caractéristique des lignes de transmission utilisées dans l'application visée (par exemple 50 ohms). Cette précaution assure que la puissance hyperfréquence injectée dans la première antenne est totalement transférée dans le film magnétique et  
10 que rien n'est réfléchi. Ceci permet également que toute la puissance transmise par les ondes magnétostatiques soit transférée à la deuxième antenne sans que rien ne soit réfléchi dans le film. On s'assurera également que les pertes ohmiques dans les antennes restent faibles devant la puissance transférée aux ondes magnétostatiques, de manière à  
15 limiter les pertes d'insertion.

En ce qui concerne l'épaisseur du film ferromagnétique 2, on peut noter que si la couche dépasse une certaine épaisseur (supérieure à 1  $\mu\text{m}$  pour le NiFe/Fe), les courants de Foucault augmentent et conduisent à une relaxation plus importante. Une épaisseur préférentielle se situe entre  
20 300 et 600 nanomètres. A titre indicatif, les dispositifs à YIG ont une épaisseur de 5  $\mu\text{m}$ , et les dispositifs à ferrites de l'ordre de quelques millimètres.

Des résultats satisfaisants peuvent être obtenus avec des épaisseurs  $e_2$  du film 2 comprises entre environ 250 et 450 nanomètres et  
25 de préférence de l'ordre de 300 nanomètres, qui constituent de bons compromis afin d'obtenir un couplage suffisant avec les antennes 10, 20 sans que par ailleurs les courants de Foucault induits dans l'épaisseur du film 2 soient trop importants.

La Figure 4 montre un mode de réalisation particulier d'un dispositif  
30 à ondes magnétostatiques selon l'invention dans lequel on a disposé en superposition à un film mince ferromagnétique conducteur 2, par exemple en permalloy, non seulement deux antennes transductrices coplanaires 10, 20 pouvant présenter par exemple la configuration de la Figure 3, mais également une troisième antenne transductrice 30 qui est également  
35 coplanaire aux antennes 10, 20, présente une configuration qui peut être similaire à celles-ci et qui est interposée entre les antennes 10 et 20. La

troisième antenne 30 s'étend transversalement sur toute la largeur du film 2 comme les antennes 10 et 20.

A titre d'exemple, avec un film 2 de largeur 700  $\mu\text{m}$ , le distance  $D_{13}$  entre les première et troisième antennes 10, 30 peut être de l'ordre de 50  $\mu\text{m}$  et la distance  $D_{32}$  entre les troisième et deuxième antennes 30, 20 peut être de l'ordre de 100  $\mu\text{m}$ . Ces distances ne sont naturellement données qu'à titre d'exemples.

La présence d'une troisième antenne hyperfréquence 30 permet, en combinaison avec les première et deuxième antennes 10, 20, d'effectuer des mesures de pertes réelles au sein du dispositif et d'en déduire la relaxation des ondes, ce qui permet ensuite d'ajuster les valeurs de certains paramètres du dispositif, telle que la distance entre les antennes principales 10, 20.

Dans le cas de trois antennes 10, 20, 30, une antenne peut être utilisée en émission des ondes magnétostatiques tandis que les deux autres antennes peuvent être utilisées en réception après des trajets des ondes magnétostatiques sur des distances différentes au sein du film 2. Un tel dispositif est donc essentiellement utilisé dans le cadre de développements ou de mises au point de nouveaux dispositifs hyperfréquences.

D'une manière générale, en mesurant le signal transmis entre deux antennes 10, 20, il est possible d'observer directement la propagation d'un paquet d'ondes de spin. On peut ainsi mesurer le retard propagatif ( $\Delta t$ ), l'atténuation propagative (en comparant l'amplitude transmise à l'amplitude de la résonance mesurée en réflexion) et évaluer la non réciprocity en champ.

Cette dernière propriété est une particularité des ondes magnétostatiques de surface (propagation perpendiculaire au champ appliqué, ces deux vecteurs étant dirigés dans le plan du film) : celles-ci sont en effet évanescentes dans l'épaisseur du film. Elles sont donc localisées plus particulièrement sur une des surfaces de la couche (surface supérieure dans un sens de propagation, surface inférieure dans l'autre). En changeant le sens de propagation (ou en changeant le sens du champ appliqué, ce qui revient au même), on peut ainsi changer la surface près de laquelle se propage l'onde. Or, les antennes transductrices 10, 20 étant

situées au-dessus du film 2, elles se couplent mieux à la face supérieure du film.

Malgré la relaxation élevée dans les films métalliques, les dispositifs selon l'invention permettent d'obtenir des résultats particulièrement  
5 avantageux dès lors que les antennes sont réalisées avec des dimensions suffisamment petites et sont disposées avec un écartement optimisé comme indiqué plus haut.

On décrira ci-dessous divers exemples d'applications du dispositif selon l'invention à des dispositifs de traitement de signaux  
10 hyperfréquences.

On a représenté sur la Figure 5 le schéma de principe d'un atténuateur commandable par un courant. Dans ce cas, on associe un dispositif de base comprenant un film mince ferromagnétique conducteur 2 et deux antennes transductrices coplanaires 10, 20, tel que décrit plus  
15 haut, à des premiers moyens 5, tels qu'une paire d'aimants permanents ou de bobines d'électroaimant, pour appliquer un champ magnétique  $H_A$  transversal dans le sens de la largeur  $L$  du film 2. On dispose en outre une paire de bobines d'électroaimants 6 pour appliquer un champ magnétique  $H_B$  longitudinal dans le sens de la longueur du film 2. Des moyens de  
20 commande sont associés par exemple aux bobines 6 pour modifier sélectivement les caractéristiques du champ magnétique  $H_B$  et par suite les caractéristiques du champ magnétique résultant  $H_R$  agissant sur le film 2. Les moyens de commande peuvent aussi agir de façon alternative sur des bobines d'électroaimant des moyens 5 d'application du champ  
25 magnétique  $H_A$ , voire à la fois sur l'ensemble des moyens 5 et 6.

Dans un tel dispositif atténuateur, la valeur de l'atténuation est ainsi déterminée par l'intensité ou préférentiellement l'orientation du champ magnétique uniforme de polarisation. Comme on l'a indiqué, un mode de  
réalisation simple peut comprendre une polarisation magnétique  
30 transversale appliquée de façon permanente et une polarisation axiale variable ajoutée de façon à modifier l'orientation du champ magnétique résultant.

Un dispositif commutateur peut être réalisé de la même manière, la commutation s'opérant en coupant complètement la transmittivité du  
35 dispositif en se plaçant hors résonance, comme c'est le cas si l'on provoque une rotation de  $90^\circ$  de l'aimantation de la couche, par exemple



en interrompant complètement l'application du champ magnétique transversal par les bobines d'électroaimant 5 lorsque l'on applique simultanément le champ magnétique longitudinal par les bobines d'électroaimant 6.

5 Un dispositif commutateur peut comprendre à titre de variante une couche mince de matériau ferromagnétique conducteur 2 ayant plusieurs états stables à rémanence (anisotropie cubique) et des moyens d'application d'une impulsion de champ magnétique pour passer d'un état stable à l'autre.

10 L'invention est également applicable à des dispositifs de traitement de signaux hyperfréquences du type passif tels que des isolateurs ou des circulateurs dans lesquels lorsqu'on envoie une onde incidente dans le système, celui-ci coupe l'onde réfléchie.

La Figure 6 montre schématiquement un exemple de circulateur  
15 pouvant être réalisé conformément à l'invention avec un film mince ferromagnétique conducteur 40 plan qui, au lieu d'être linéaire, présente la forme d'une couronne. Des antennes transductrices coplanaires 11, 12, 13 semblables aux antennes transductrices 10, 20 sont réparties autour de la couronne 40 et s'étendent transversalement à celle-ci.

20 On applique un champ magnétique radial dans le plan du circulateur. L'efficacité peut être de l'ordre de 20 dB ou plus.

Le nombre d'antennes transductrices 11, 12, 13 peut être égal à 3 ou être plus élevé selon les applications envisagées.

Dans le cas d'un circulateur à trois antennes 11, 12, 13 tel que celui  
25 de la Figure 6, le fonctionnement peut être le même qu'avec des circulateurs connus utilisant des ferrites, c'est-à-dire qu'un signal introduit par l'antenne 11 sera transmis par le champ magnétique rotatif vers l'antenne 12 mais pas vers l'antenne 13. Un signal appliqué par l'antenne 12 sera transmis vers l'antenne 13 mais pas vers l'antenne 11, etc.

30 Par son caractère intégrable, le dispositif circulateur selon l'invention peut être réalisé à faible coût et sous une forme miniaturisée.

Des isolateurs peuvent être réalisés de la même façon que des circulateurs.

On indiquera à nouveau les différences entre les dispositifs connus  
35 à ondes magnétostatiques dans le YIG ou dans des ferrites et les dispositifs à film ferromagnétique conducteur mince selon l'invention, en

référence à la Figure 8 qui montre des courbes a et b donnant la pulsation  $\Omega$  en fonction du module de vecteur d'onde magnétostatique k.

Pour la même fréquence, on a un vecteur d'onde beaucoup plus élevé dans le cas des ondes magnétostatiques.

5        Cette courbe donne la dispersion du matériau pour plusieurs modes de propagation, c'est-à-dire la courbe de la pulsation correspondant à chaque module de vecteur d'onde magnétostatique. On constate que cette courbe a trois branches. La courbe a correspond à un mode électromagnétique modifié par les propriétés gyromagnétiques du film  
10 ferromagnétique (on retrouve une relation  $\omega = ck$  comme pour les ondes lumineuses), c'est la branche qui est utilisée pour faire fonctionner les dispositifs à ferrites (comme les circulateurs à jonction Y). La courbe b comporte deux branches. Celle du dessus est celle des ondes magnétostatiques. Pour un vecteur d'onde nul, on retrouve une fréquence  
15 de résonance non nulle : c'est la résonance ferromagnétique, telle qu'elle est utilisée dans le brevet US 4 853 660. A vecteur d'onde un peu plus élevé, on retrouve des modes magnétostatiques propagatifs, qui sont utilisés par les dispositifs à YIG et selon l'invention.

Dans les circulateurs (dits à jonction Y) connus, à ferrites, le mode  
20 stationnaire électromagnétique impose une longueur d'onde de travail  $\lambda$  telle que  $\lambda$  soit du même ordre de grandeur que le diamètre de la pastille magnétique. Ce mode stationnaire électromagnétique impose sans ferrite un  $\lambda$  supérieur à 1 cm, et avec une ferrite, un  $\lambda$  variant avec la perméabilité magnétique de la ferrite, mais que l'on peut situer autour de  
25 quelques mm.

A l'opposé, dans un circulateur selon l'invention, le mode stationnaire électromagnétique impose une longueur d'onde de travail  $\lambda$  telle que  $\lambda$  soit du même ordre de grandeur que le pas de l'antenne. A titre indicatif, ce mode magnétique pur impose, pour une fréquence de  
30 3 GHz un  $\lambda$  de l'ordre de 100  $\mu\text{m}$  avec un film magnétique métallique d'épaisseur 300 nm.

On donnera ci-dessous à titre d'exemple en référence aux Figures 7A à 7J un procédé de fabrication permettant de fabriquer des échantillons intégrés comportant des motifs magnétiques tels que le film mince  
35 ferromagnétique conducteur 2 des Figures 1 et 2 et des antennes telles que les antennes des Figures 1 à 3.

Sur la Figure 7A, on voit une première étape dans laquelle une couche de  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  est déposée par évaporation sur un substrat de verre.

Sur la Figure 7B, on voit une deuxième étape dans laquelle les motifs magnétiques sont écrits par la technique de lithographie optique positive. Une couche 103 de résine photosensible st déposée sur la couche de  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ . Un masque 104 est disposé sur la couche de résine 103 et l'ensemble est éclairé par une lampe ultraviolette 105 pour dégrader la résine photosensible 105 dans les zones non protégées par le masque 104. Les zones isolées sont ensuite dissoutes. Il ne reste de la résine 106 que dans les zones initialement protégées par les motifs métalliques du masque 104.

Sur la Figure 7C, l'échantillon est érodé par gravure ionique.

Etant donné le rapport d'épaisseur entre les couches 102 et 104, le film de résine optique restant 106 est encore très épais au moment de l'arrêt du bombardement ionique et doit être enlevé chimiquement.

La Figure 7D montre le film mince 107 de  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  restant à la fin de l'étape précédente.

On dépose ensuite une couche d'isolant 108 (espaceur) tel que  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ou  $\text{SiO}$  de manière à isoler électriquement les antennes qui vont être ensuite déposées au-dessus des motifs magnétiques (Figure 7E).

Les Figures 7F à 7J montrent les différentes étapes d'une deuxième lithographie optique permettant le dépôt des antennes.

A l'étape de la Figure 7F, la lampe ultraviolette 105 éclaire une couche de résine photosensible inversible 110 recouverte d'un masque 111 et déposée préalablement sur la couche d'isolant 108.

A l'étape de la Figure 7G, après retrait du masque 111, l'échantillon est chauffé, ce qui induit une deuxième dégradation de l'agent photosensible déjà transformé par la lumière : la molécule obtenue devient inhibitrice de dissolution, mais n'est plus sensible à la lumière. Tout l'échantillon peut ensuite être insolé, de manière à rendre très solubles les zones initialement protégées par les motifs métalliques du masque.

A l'étape de la Figure 7H, après le développement et attaque des zones 113 précédemment protégées par le masque 111, on obtient une image négative du masque.

On notera que lors de l'étape de la Figure 7F, l'absorption de la lumière par la résine pendant la première exposition conduit à une insolation plus importante de la partie supérieure. C'est donc cette zone qui sera la plus insoluble au cours du développement de l'étape de la Figure 7H. La partie inférieure de la résine 110 peut ainsi être dissoute un peu plus pour former un profil avec des tranchées 113 présentant une forme évasée vers le bas.

Les étapes des Figures 7I et 7J sont des étapes d'un procédé dit de "lift off" dans lequel on commence par déposer la couche 114, 115 (d'argent ou de cuivre) devant former les antennes au-dessus de l'ensemble de l'échantillon. L'échantillon est ensuite plongé dans un solvant afin de dissoudre la résine 110 et de ne conserver du matériau métallique 114 que sur les zones initialement dégagées par les tranchées 113.

On notera que si les espaceurs 108 sont transparents, les masques 111 des antennes peuvent facilement être alignés par rapport aux motifs magnétiques 107.

D'autres procédés de fabrication de dispositifs hyperfréquences intégrés conformes à l'invention permettant de réaliser des films minces de matériau ferromagnétique conducteur associés à des antennes coplanaires à couplage inductif peuvent naturellement être mis en œuvre à partir des techniques de la microélectronique. En particulier, le substrat 1 supportant la couche ferromagnétique 2 peut être réalisé à base de silicium.

25

### REVENDEICATIONS

1. Dispositif intégré à ondes magnétostatiques, caractérisé en ce qu'il comprend un substrat (1), un film mince ferromagnétique (2) conducteur, d'épaisseur ( $e_2$ ) comprise entre environ 250 et 450 nm et de  
5 préférence de l'ordre de 300 nanomètres, ce film mince (2) étant disposé sur ledit substrat (1), une première antenne transductrice (10) de réception de signaux électriques hyperfréquences, disposée parallèlement audit film mince ferromagnétique (2) à proximité de celui-ci pour créer dans ce matériau, par couplage inductif, des ondes magnétostatiques ou  
10 des ondes de spin, et une deuxième antenne transductrice (20) d'émission de signaux électriques hyperfréquences, disposée parallèlement audit film mince ferromagnétique (2) à proximité de celui-ci pour être couplée inductivement et délivrer des signaux électriques hyperfréquences lors de l'arrivée d'une onde magnétostatique dans le film mince ferromagnétique  
15 (2), ladite deuxième antenne (20) étant située du même côté du film mince ferromagnétique (2) que la première antenne (10) de façon essentiellement coplanaire à cette dernière.
2. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que le film mince ferromagnétique (2) est en un alliage magnétique dont  
20 l'aimantation à saturation est supérieure ou égale à 0,6 T.
3. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que le film mince ferromagnétique (2) est en un alliage magnétique très doux tel que  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ .
4. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 3,  
25 caractérisé en ce que le film mince ferromagnétique (2) présente une largeur (L) de l'ordre de quelques dizaines de micromètres.
5. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que la distance ( $e_3$ ) entre d'une part les première et deuxième antennes transductrices (10, 20) et d'autre part le film mince  
30 ferromagnétique (2) est de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de nanomètres.
6. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que la distance d'écartement (D) entre les première et deuxième antennes transductrices (10, 20) est comprise entre environ 30  
35 et 100 micromètres et de préférence voisine de 40 micromètres.

7. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que les première et deuxième antennes transductrices (10, 20) comprennent une âme centrale (31) et deux conducteurs latéraux de masse (32, 33) parallèles à l'âme centrale (31) et situés sans contact  
5 de part et d'autre de celle-ci.

8. Dispositif selon la revendication 7, caractérisé en ce que l'âme centrale présente une largeur de l'ordre de quelques micromètres.

9. Dispositif selon la revendication 6, caractérisé en ce que chacune des première et deuxième antennes transductrices (10, 20) s'étend sur  
10 toute la largeur (L) du film mince ferromagnétique (2) et occupe dans le sens longitudinal de ce film un espace dont la largeur est inférieure à ladite distance d'écartement (D) et est compris entre environ 10 et 60 micromètres.

10. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, caractérisé en ce que l'une au moins des première et deuxième antennes transductrices (10, 20) présente une forme de serpentín avec une succession de branches s'étendant dans le sens de la largeur (L) du film mince ferromagnétique (2).  
15

11. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, caractérisé en ce que chacune des première et deuxième antennes transductrices (10, 20) présente une longueur inférieure au quart de la longueur d'onde des ondes hyperfréquences.  
20

12. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, caractérisé en ce que la fréquence des ondes hyperfréquences est comprise entre environ 1 GHz et 100 GHz.  
25

13. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, caractérisé en ce qu'il est réalisé de façon intégrée avec un substrat (1) semiconducteur.

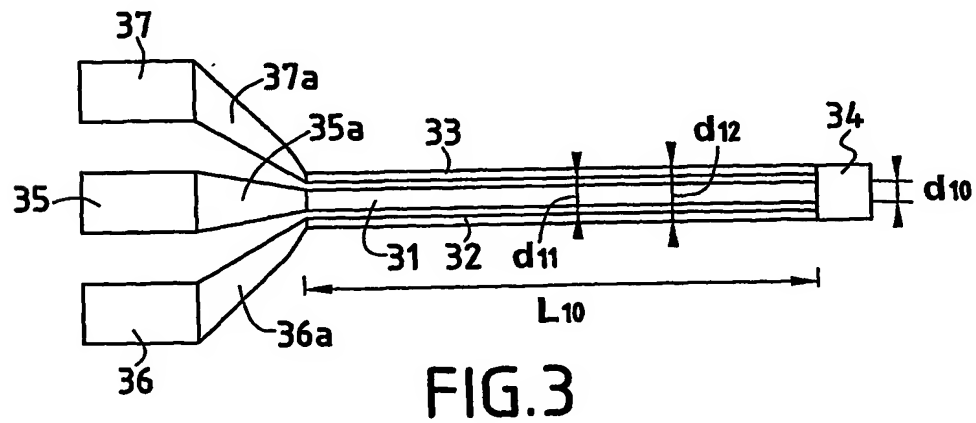
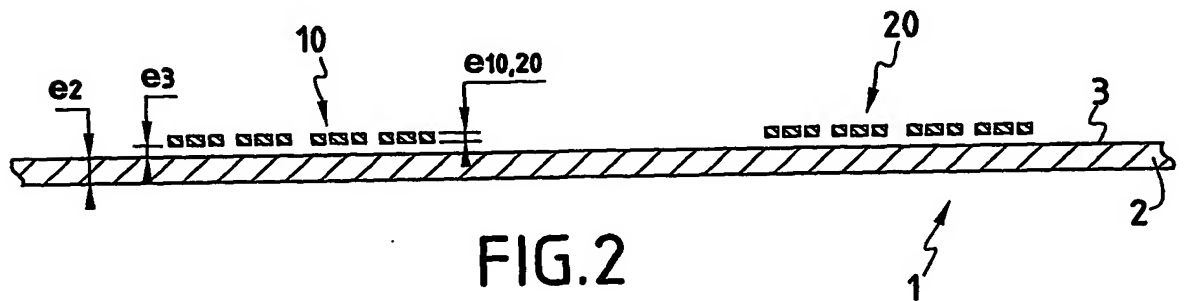
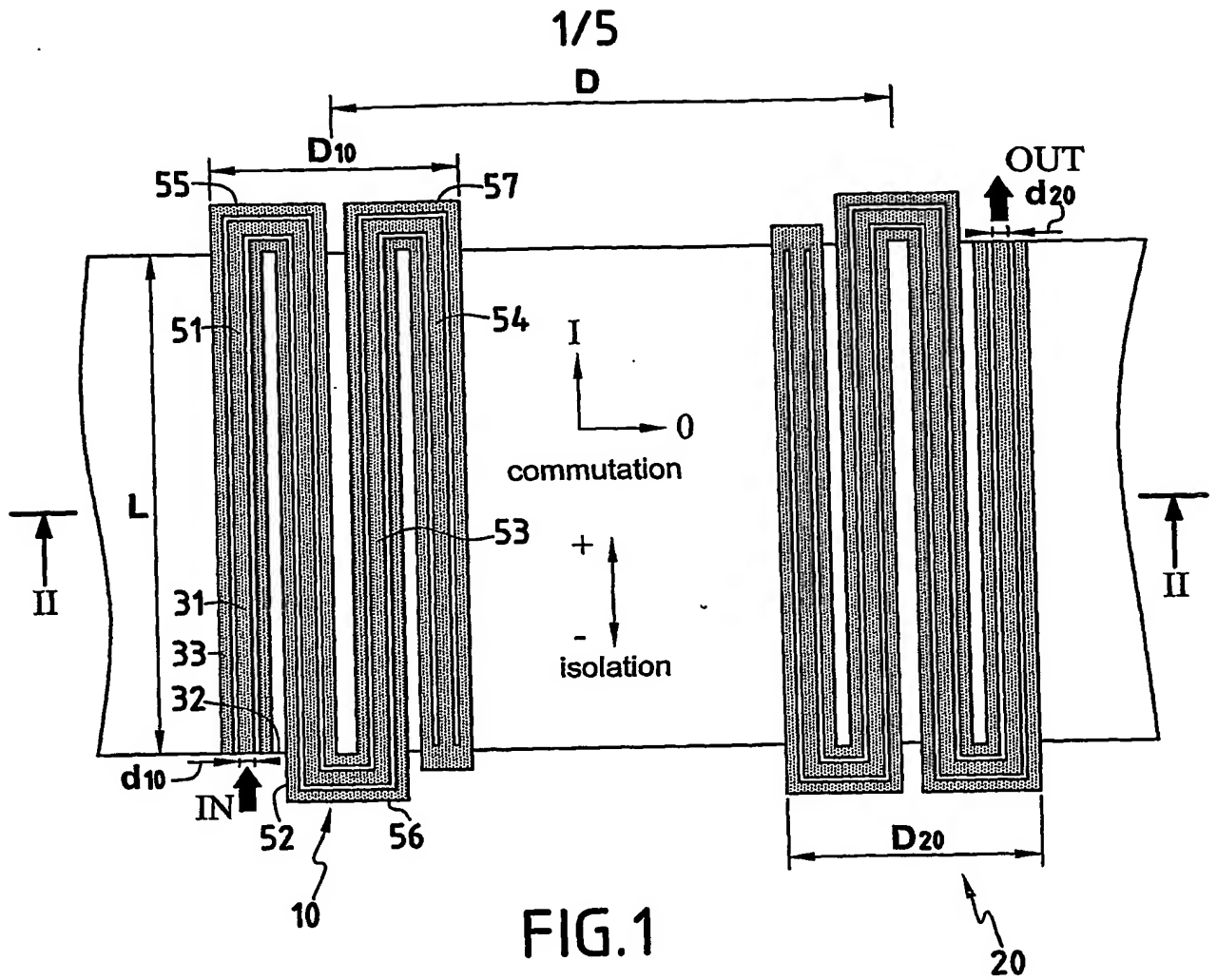
14. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 13, caractérisé en ce qu'il comprend une troisième antenne transductrice (30) disposée parallèlement audit film mince ferromagnétique (2) à proximité de celui-ci pour être couplée inductivement et délivrer des signaux électriques hyperfréquences lors de l'arrivée d'une onde magnétostatique dans le film mince ferromagnétique (2), ladite troisième antenne (30)  
30 étant située du même côté du film mince ferromagnétique (2) que les  
35

première et deuxième antennes (10, 20) en étant interposée entre celles-ci de façon coplanaire.

15. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 14, caractérisé en ce qu'il est appliqué à un atténuateur ou un commutateur  
5 commandable par un courant et en ce qu'il comprend en outre des premiers moyens (5) d'application d'un champ magnétique ( $H_A$ ) transversal dans le sens de la largeur (L) du film mince ferromagnétique (2), des seconds moyens (6) d'application d'un champ magnétique ( $H_B$ ) longitudinal dans le sens de la longueur du film mince ferromagnétique (2)  
10 et des moyens de commande d'au moins l'un des premiers et deuxièmes moyens (5, 6) d'application d'un champ magnétique pour modifier sélectivement les caractéristiques du champ magnétique résultant ( $H_R$ ) agissant sur le film mince ferromagnétique (2).

16. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 14, caractérisé en ce qu'il est appliqué à un isolateur ou un circulateur et en  
15 ce qu'il comprend des moyens pour orienter un champ magnétique appliqué au film mince ferromagnétique (2) de telle manière qu'il y ait non réciprocité des première et deuxième antennes transductrices (10, 20), un signal d'ondes magnétostatiques n'étant transmis de façon significative  
20 que de la première antenne (10) vers la seconde antenne (20).

17. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il est appliqué à un commutateur commandable par un courant, en ce que le film mince ferromagnétique conducteur (2) est en un matériau présentant par anisotropie cubique plusieurs états stables à résonance et en ce qu'il  
25 comprend en outre des moyens d'application d'impulsions de champ magnétique pour faire basculer le film mince d'un état stable à l'autre.





2/5

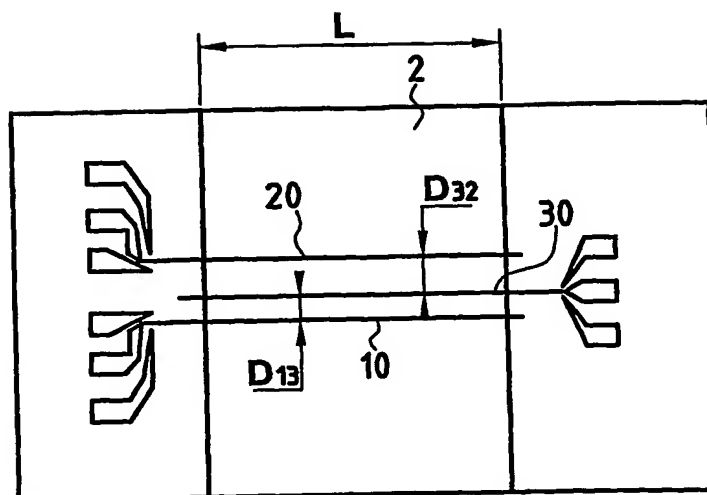


FIG. 4

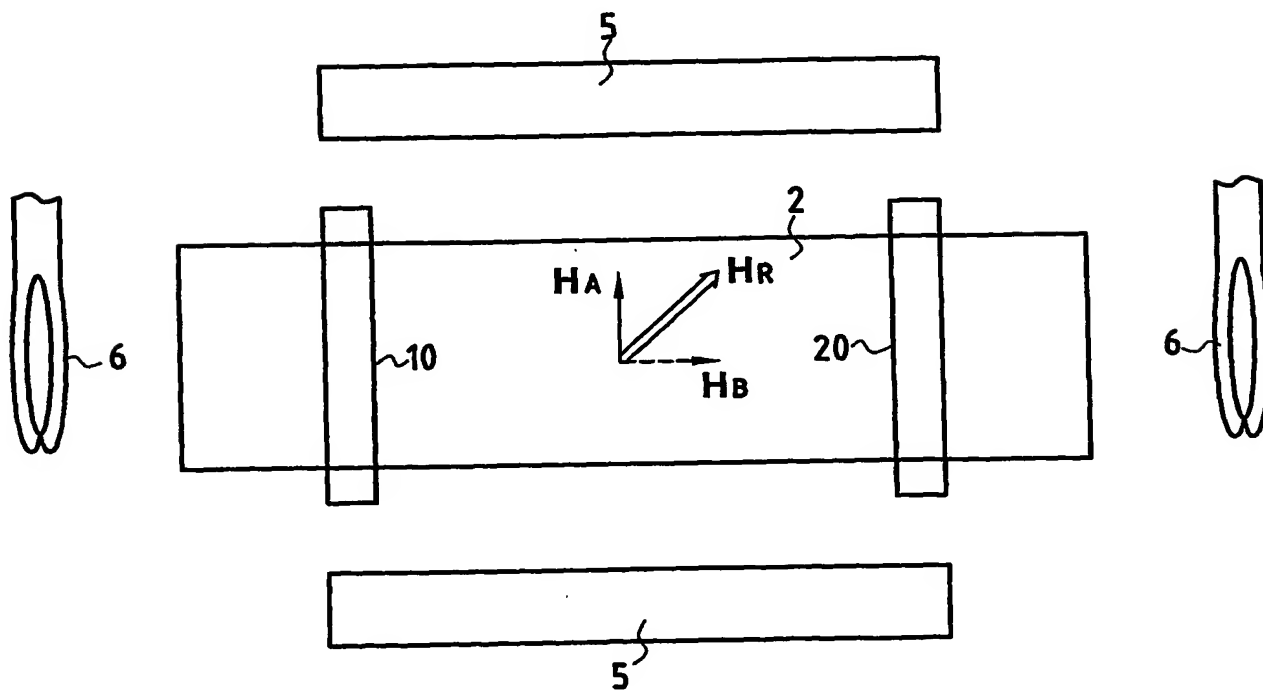


FIG. 5

3/5

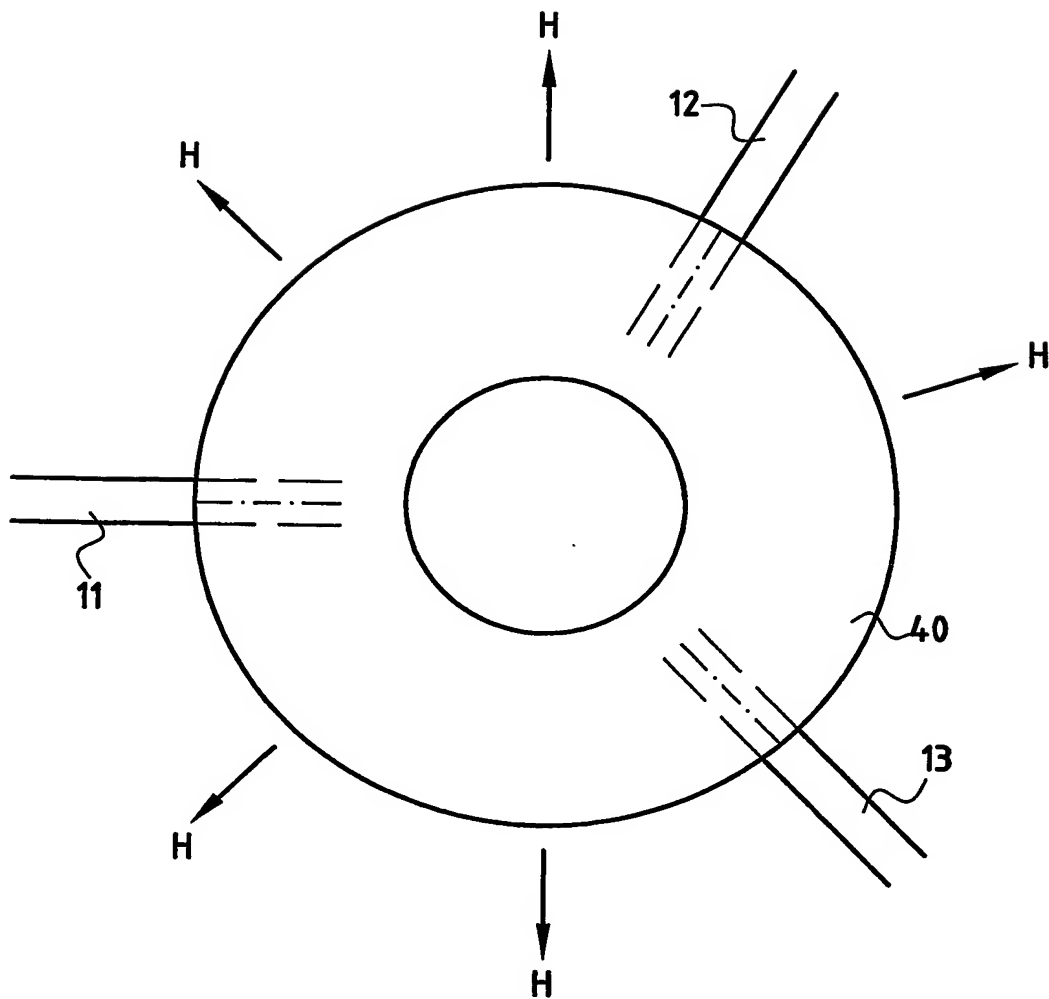


FIG.6

4/5

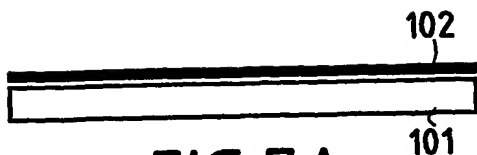


FIG. 7A

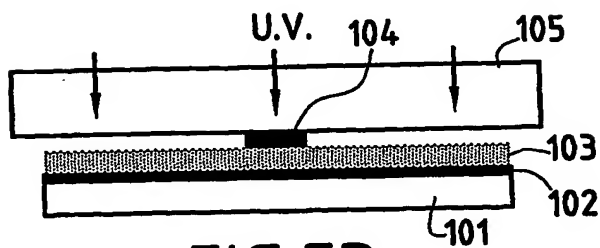


FIG. 7B

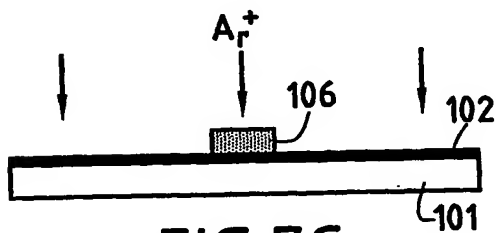


FIG. 7C

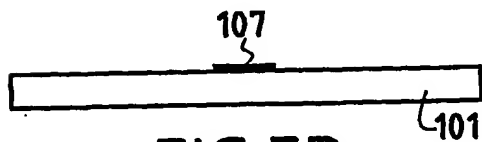


FIG. 7D

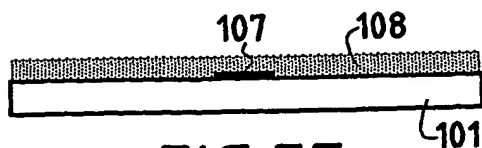


FIG. 7E

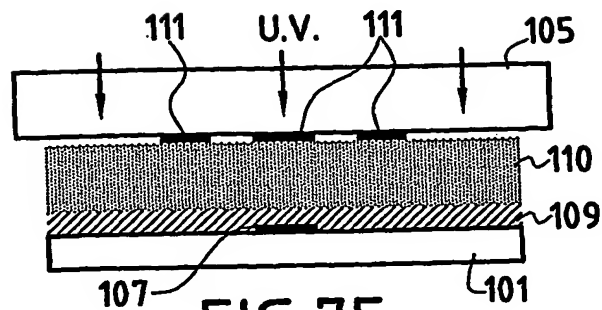


FIG. 7F

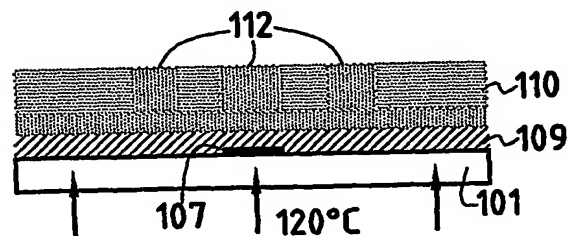


FIG. 7G

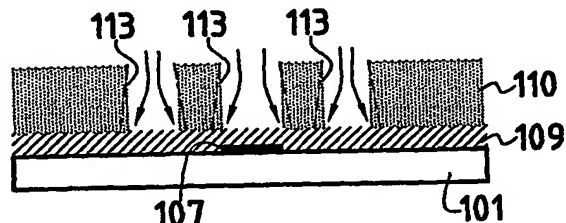


FIG. 7H

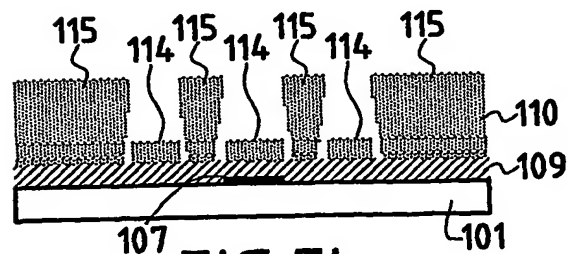


FIG. 7I

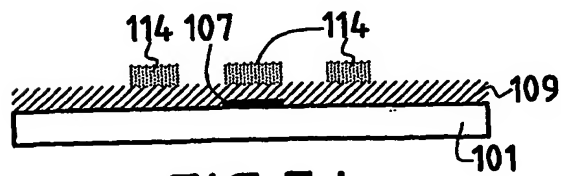


FIG. 7J

5/5

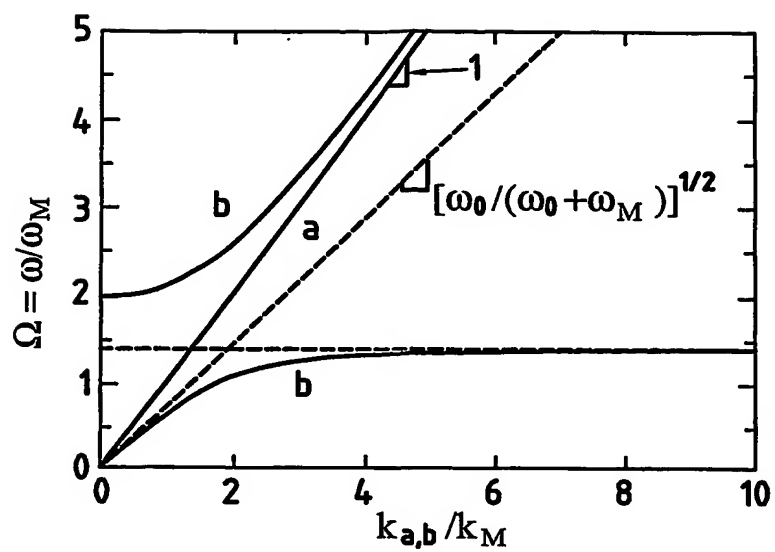


FIG.8

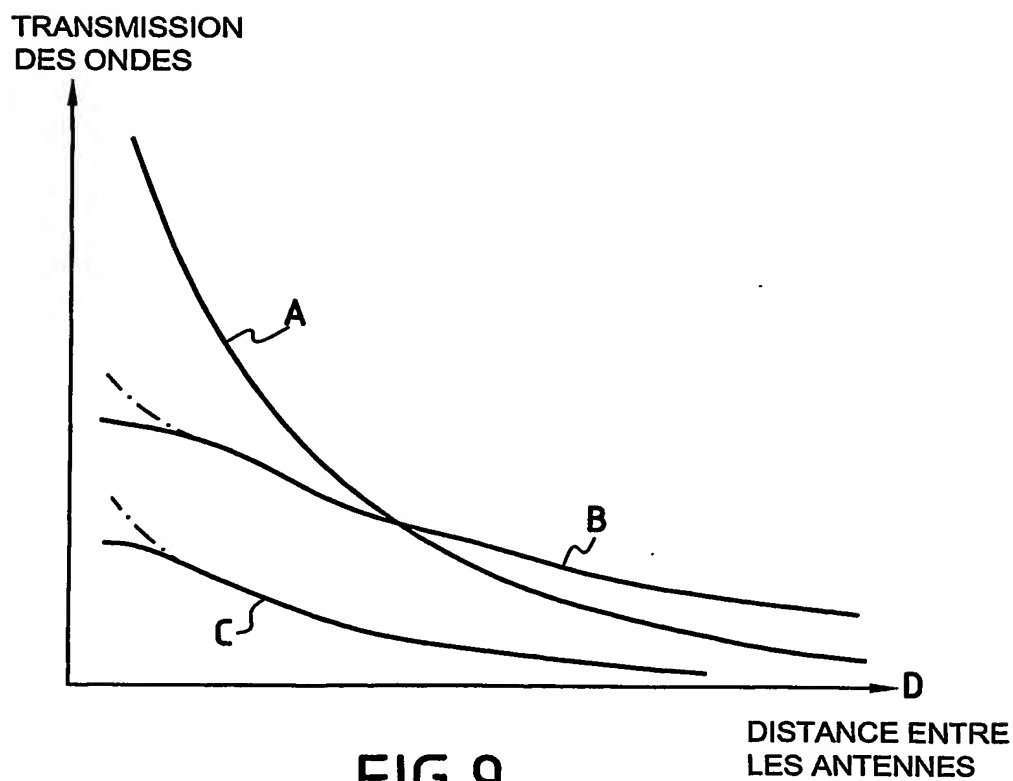


FIG.9

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION  
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété  
Intellectuelle  
Bureau international



(43) Date de la publication internationale  
13 mai 2004 (13.05.2004)

PCT

(10) Numéro de publication internationale  
**WO 2004/040756 A3**

(51) Classification internationale des brevets<sup>7</sup> : H03H 2/00

(21) Numéro de la demande internationale :  
PCT/FR2003/003180

(22) Date de dépôt international :  
27 octobre 2003 (27.10.2003)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :  
0213486 28 octobre 2002 (28.10.2002) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : COM-  
MISSARIAT A L'ÉNERGIE ATOMIQUE [FR/FR]; 31  
Rue de la Fédération, F-75015 PARIS (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) :

BAILLEUL, Mathieu [FR/FR]; 19 Rue d'Alésia,  
F-75014 PARIS (FR). FERMON, Claude [FR/FR]; 6  
Allée Boileau, F-91400 ORSAY (FR).

(74) Mandataires : THEVENET, Jean-Bruno etc.; CAB-  
INET BEAU DE LOMENIE, 158 Rue de l'Université,  
F-75340 PARIS Cedex 07 (FR).

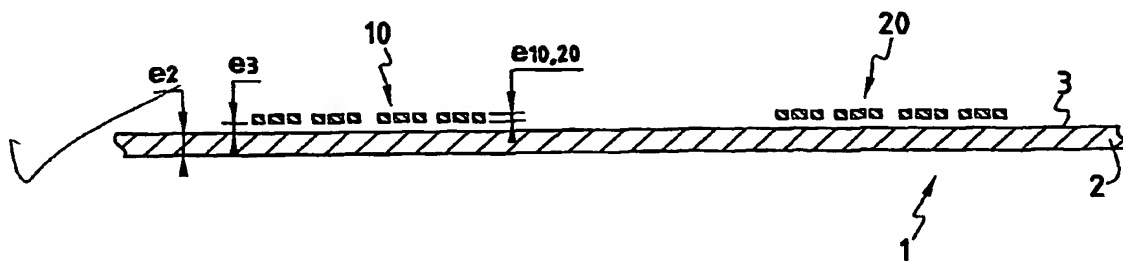
(81) États désignés (national) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ,  
BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ,  
DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH,  
GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC,  
LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW,  
MX, MZ, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC,  
SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,  
UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (régional) : brevet ARIPO (GH, GM, KE,  
LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), brevet  
eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), brevet  
européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: MAGNETOSTATIC WAVE DEVICE BASED ON THIN METAL FILMS, METHOD FOR MAKING SAME AND APPLICATION TO DEVICES FOR PROCESSING MICROWAVE SIGNALS

(54) Titre : DISPOSITIF A ONDES MAGNETOSTATIQUES BASE SUR DES FILMS MINCES METALLIQUES, PROCEDE DE FABRICATION ET APPLICATION A DES DISPOSITIFS DE TRAITEMENT DE SIGNAUX HYPERFREQUENCES



(57) Abstract: The invention concerns an integrated magnetostatic wave device comprising a substrate (1), a conductive ferromagnetic thin film (2) arranged on the substrate (1), a first transducer antenna (10) for receiving microwave electric signals, arranged parallel to said ferromagnetic thin film (2) proximate thereto to generate in said material, through inductive coupling, magnetostatic waves or spin waves, and a second transducer antenna (20) for transmitting microwave electric signals, arranged parallel to said ferromagnetic thin film (2) proximate thereto to be inductively coupled and deliver microwave electric signals when a magnetostatic wave reaches the ferromagnetic thin film (2) said second antenna (10) being located on the same side of the ferromagnetic thin film (2) as the first antenna (10) substantially coplanar thereto.

(57) Abrégé : Le dispositif intégré à ondes magnétostatiques comprend un substrat (1), un film mince ferromagnétique (2) conducteur disposé sur le substrat (1), une première antenne transductrice (10) de réception de signaux électriques hyperfréquences, disposée parallèlement audit film mince ferromagnétique (2) à proximité de celui-ci pour créer dans ce matériau, par couplage inductif, des ondes magnétostatiques ou des ondes de spin, et une deuxième antenne transductrice (20) d'émission de signaux électriques hyperfréquences, disposée parallèlement audit film mince ferromagnétique (2) à proximité de celui-ci pour être couplée inductivement et délivrer des signaux électriques hyperfréquences lors de l'arrivée d'une onde magnétostatique dans le film mince ferromagnétique (2), ladite deuxième antenne (20) étant située du même côté du film mince ferromagnétique (2) que la première antenne (10) de façon essentiellement coplanaire à cette dernière.

WO 2004/040756 A3



FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), brevet OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

*En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.*

**Publiée :**

- avec rapport de recherche internationale
- avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues

**(88) Date de publication du rapport de recherche internationale:** 29 juillet 2004

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No  
PCT/FR 03/03180

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER  
IPC 7 H03H2/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)  
IPC 7 H03H

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, INSPEC

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>BAILLEUL M ET AL: "Spin waves propagation and confinement in conducting films at the micrometer scale" EUROPHYSICS LETTERS, 1 DEC. 2001, EUR. PHYS. SOC. BY EDP SCIENCES AND SOC. ITALIANA FISICA, FRANCE, vol. 56, no. 5, 1 December 2001 (2001-12-01), pages 741-747, XP008019276 ISSN: 0295-5075 page 742, line 1 - page 743, line 23; figure 1</p> <p style="text-align: center;">----- -/--</p>	1-6,9-12

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

### \* Special categories of cited documents :

- \*A\* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- \*E\* earlier document but published on or after the international filing date
- \*L\* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- \*O\* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- \*P\* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- \*T\* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- \*X\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- \*Y\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
- \*G\* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

21 May 2004

Date of mailing of the international search report

24/06/2004

Name and mailing address of the ISA  
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

D/L PINTA BALLE..., L

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No  
PCT/FR 03/03180

## C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 4 283 692 A (ADAM JOHN D) 11 August 1981 (1981-08-11) column 1, line 30 - line 64 column 2, line 67 - column 4, line 41 column 5, line 56 - line 64 figure 12	7,8,15
A	US 4 853 660 A (SCHLOEMANN ERNST F R A) 1 August 1989 (1989-08-01) cited in the application column 4, line 48 - column 5, line 35 column 9, line 24 - line 26 figure 2	1,13,15, 17
A	US 4 188 594 A (BONGIANNI WAYNE L) 12 February 1980 (1980-02-12) column 6, line 49 - column 7, line 4 column 7, line 64 - column 8, line 2 column 8, line 59 - column 9, line 12 figures	15
A	US 3 157 865 A (MICHAEL BRADLEY EDWARD) 17 November 1964 (1964-11-17) column 1, line 13 - column 4, line 13	17
A	WEI WU ET AL: "Ferromagnetic Fe/Ag-GaAs waveguide structures for wideband microwave integrated notch filter devices" CONFERENCE PROCEEDINGS, 19 June 2000 (2000-06-19), pages 51-52, XP010517453 the whole document	1,2,13
A	ISHAK W S: "MAGNETOSTATIC WAVE TECHNOLOGY: A REVIEW" PROCEEDINGS OF THE IEEE, IEEE. NEW YORK, US, vol. 76, no. 2, 1 February 1988 (1988-02-01), pages 171-187, XP000047990 ISSN: 0018-9219 cited in the application paragraphs 'II.B!', 'II.C!', 'III.C!; figures 3,9-11	1



# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No  
PCT/FR 03/03180

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)		Publication date
US 4283692	A	11-08-1981	NONE		
US 4853660	A	01-08-1989	CA	1291578 C	29-10-1991
US 4188594	A	12-02-1980	NONE		
US 3157865	A	17-11-1964	GB	935704 A	04-09-1963
			CH	382802 A	15-10-1964
			DE	1269658 B	06-06-1968
			FR	1299901 A	27-07-1962
			NL	268929 A	
			SE	310373 B	28-04-1969

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Deposition Internationale No  
PCT/FR 03/03180

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE  
CIB 7 H03H2/00

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)  
CIB 7 H03H

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés)  
EPO-Internal. INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	<p>BAILLEUL M ET AL: "Spin waves propagation and confinement in conducting films at the micrometer scale" EUROPHYSICS LETTERS, 1 DEC. 2001, EUR. PHYS. SOC. BY EDP SCIENCES AND SOC. ITALIANA FISICA, FRANCE, vol. 56, no. 5, 1 décembre 2001 (2001-12-01), pages 741-747, XP008019276 ISSN: 0295-5075 page 742, ligne 1 - page 743, ligne 23; figure 1</p> <p style="text-align: center;">----- -/--</p>	1-6,9-12

☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

\* Catégories spéciales de documents cités:

- \*A\* document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
- \*E\* document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
- \*L\* document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
- \*O\* document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
- \*P\* document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

\*T\* document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention

\*X\* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément

\*Y\* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier

\*Z\* document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

21 mai 2004

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

24/06/2004

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale  
Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

D/L PINTA BALLE..., L

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Dep. de Internationale No  
PCT/FR 03/03180

C.(suite) DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	US 4 283 692 A (ADAM JOHN D) 11 août 1981 (1981-08-11) colonne 1, ligne 30 - ligne 64 colonne 2, ligne 67 - colonne 4, ligne 41 colonne 5, ligne 56 - ligne 64 figure 12 -----	7,8,15
A	US 4 853 660 A (SCHLOEMANN ERNST F R A) 1 août 1989 (1989-08-01) cité dans la demande colonne 4, ligne 48 - colonne 5, ligne 35 colonne 9, ligne 24 - ligne 26 figure 2 -----	1,13,15, 17
A	US 4 188 594 A (BONGIANNI WAYNE L) 12 février 1980 (1980-02-12) colonne 6, ligne 49 - colonne 7, ligne 4 colonne 7, ligne 64 - colonne 8, ligne 2 colonne 8, ligne 59 - colonne 9, ligne 12 figures -----	15
A	US 3 157 865 A (MICHAEL BRADLEY EDWARD) 17 novembre 1964 (1964-11-17) colonne 1, ligne 13 - colonne 4, ligne 13 -----	17
A	WEI WU ET AL: "Ferromagnetic Fe/Ag-GaAs waveguide structures for wideband microwave integrated notch filter devices" CONFERENCE PROCEEDINGS, 19 juin 2000 (2000-06-19), pages 51-52, XP010517453 le document en entier -----	1,2,13
A	ISHAK W S: "MAGNETOSTATIC WAVE TECHNOLOGY: A REVIEW" PROCEEDINGS OF THE IEEE, IEEE. NEW YORK, US, vol. 76, no. 2, 1 février 1988 (1988-02-01), pages 171-187, XP000047990 ISSN: 0018-9219 cité dans la demande alinéas 'II.B!', 'II.C!', 'III.C!'; figures 3,9-11 -----	1

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Deposition internationale No  
PCT/FR 03/03180

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)		Date de publication
US 4283692	A	11-08-1981	AUCUN		
US 4853660	A	01-08-1989	CA	1291578 C	29-10-1991
US 4188594	A	12-02-1980	AUCUN		
US 3157865	A	17-11-1964	GB	935704 A	04-09-1963
			CH	382802 A	15-10-1964
			DE	1269658 B	06-06-1968
			FR	1299901 A	27-07-1962
			NL	268929 A	
			SE	310373 B	28-04-1969